

文章编号: 2095-4980(2023)11-1387-10

基于 MEMS 硅基谐振器的磁场传感器最新进展

武颖杰^{1,2}, 吕秀梅¹, 张自强¹, 涂程², 张晓升^{*2}

(1.北京新风航天装备有限公司, 北京 100854; 2.电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 随着智能时代的到来, 磁场传感器已经广泛应用于移动设备中, 为用户提供定位和导航等服务。目前, 基于霍尔效应的磁场传感器和基于磁性材料的磁阻式传感器是人们普遍采用的 2 种磁场检测传感器。基于霍尔效应的磁场传感器的优点是成本低, 不需要外加磁性材料, 且制作工艺和互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容。这种传感器的工作范围一般为 $10 \mu\text{T} \sim 1 \text{T}$, 并可以通过增加功耗的方式来提高分辨力。磁阻式磁场传感器拥有较高的分辨力和较宽的工作范围($0.1 \text{nT} \sim 1 \text{T}$), 其性能主要取决于磁性材料。除了以上 2 种方式外, 由硅基微机电系统(MEMS)谐振器构成的谐振式磁场传感器利用洛伦兹力对磁场的依赖性实现了对磁场的检测, 具有体积小、功耗低、性能优异且与 CMOS 工艺兼容等优点, 近年来受到研究人员的广泛关注。本文回顾了由 MEMS 硅基谐振器构成的磁场传感器的最新发展动态和性能提升方法, 并总结了当前存在的挑战和未来机遇。

关键词: 微机电系统; 谐振式磁场传感器; 硅基谐振器; 压电式换能; 电容式换能

中图分类号: TN40

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022129

Review of magnetic field sensors based on MEMS silicon resonators

WU Yingjie^{1,2}, LYU Xiumei¹, ZHANG Ziqiang¹, TU Cheng², ZHANG Xiaosheng^{*2}

(1.Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co., Ltd. Beijing 100854, China; 2.School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: With the advent of the intelligent era, magnetic field sensors have been widely used in mobile devices to provide users with services such as positioning and navigation. At present, the magnetic field sensors based on Hall effect and the magnetoresistive magnetic field sensors which rely on magnetic materials are two dominant technologies in the market. The advantages of the magnetic field sensors based on the Hall effect include low cost, no need for magnetic materials and fabrication compatibility with the Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) technology. The operating range of this kind of sensors typically is from $10 \mu\text{T}$ to 1T , and the resolution can be improved by increasing the power consumption. Magnetoresistive magnetic field sensors have high resolution and wide operating range($0.1 \text{nT} \sim 1 \text{T}$), and their performances mainly depend on the magnetic materials adopted. Besides these two technologies, resonant magnetic field sensors composed of silicon-based Micro-Electro-Mechanical System(MEMS) resonators have received extensive attention in recent years due to their benefits of small form factor, low power consumption, high performance and fabrication compatibility with CMOS technology. This paper reviews the latest developments of magnetic field sensors using silicon-based MEMS resonators. In addition, methods for improving the performance of such sensors are described. The current key challenges and future opportunities are provided.

Keywords: Micro-Electro-Mechanical System(MEMS); resonant magnetometers; silicon-based resonators; piezoelectric transduction; capacitive transduction

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2022-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62074029; 61804023; 61971108; 62004029); 四川省科技厅成果转化示范资助项目(2020ZHCG0038); 四川省科技厅资助项目(2019YJ0198; 2020YJ0015); 中央高校基本科研业务费集成攻关资助项目(ZYGX2019Z002)

*通信作者: 张晓升 email:zhangxs@uestc.edu.cn

随着信息时代的到来, 磁场传感器在工业控制和导航中发挥着越来越重要的作用^[1]。人们对于磁场的测量已经进行了广泛而深入的研究。例如, 超导量子干涉装置(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)能够探测到低至 fT 量级的弱磁场^[2]。迄今为止, 超导量子干涉装置能够实现的分辨力比其他类型的磁场传感器要高。然而, 它的缺点是高昂的成本和对超低温工作环境的要求。这阻碍了它在许多场景中的应用。与之相比, 基于霍尔效应的磁场传感器的特点是成本低, 制作工艺与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容, 但它的磁场分辨力较低, 提升磁场分辨力需要以增加功耗作为代价^[3]。相对于霍尔效应传感器, 磁阻式磁场传感器拥有更高的分辨力, 并且检测的范围为 0.1 nT~0.1 T。但是磁阻式传感器由于加入了磁性的材料, 容易出现磁滞现象, 影响传感器的性能。随着智能时代的发展, 磁场传感器在移动设备中已经不可或缺。为了满足电信、汽车工业和消费电子产品等应用领域的需求, 理想的磁场传感器应该具有成本低、尺寸小、功耗低、具有良好的灵敏度和分辨力等特征^[4]。这对磁场传感器的设计带来了严峻的挑战。随着微机电系统技术(MEMS)的发展和成熟, 基于 MEMS 硅基谐振器的谐振式磁场传感器受到了研究人员越来越多的关注。这是因为使用 MEMS 技术制作的磁场传感器拥有尺寸小、功耗低和与 CMOS 工艺相兼容等优势。

近年来, 研究人员对 MEMS 硅基磁场传感器中能够实现的多种磁场检测方式进行了研究。例如, 有研究人员用光学装置检测涂有磁性材料的微机械悬臂的偏转, 进而实现对磁场的测量^[5]。有研究人员通过压阻换能方式来检测悬臂的偏转^[6]。研究人员发现通过测量 2 个靠近物体之间隧道电流的变化也可以用来检测由磁场引起的物体的位移^[7-8]。另外, 研究人员也提出了利用洛伦兹力来实现检测磁场的方案。该类型器件的工作原理是利用洛伦兹力对磁场的依赖性使微机械结构对磁场的检测转换为对力的检测。当前, 这种基于洛伦兹力的谐振式磁场传感器主要采用电容式和压电式 2 种换能方式^[9-10]。另外, 基于磁电材料的 MEMS 器件也具有较高的灵敏度, 展现出其作为微型磁场传感器的前景^[11-12]。因为微机械结构中的谐振现象对于磁场激励的电信号具有放大的作用, 可以显著提升输出信号的信噪比, 所以大多数 MEMS 硅基谐振器都工作在其机械谐振频率点。

到目前为止, 已有多种 MEMS 硅基谐振式磁场传感器获得了报道^[13-17]。这些磁场传感器的工作原理都可以简述为微机械结构在外界磁场作用下受洛伦兹力作用进而对其谐振信号产生扰动。通过检测谐振信号的变化即可实现对外界磁场的监测。如果这种扰动影响的是输出谐振信号的幅度, 则这种器件称为调幅谐振式磁场传感器。如果这种扰动影响的是输出谐振信号的频率, 则这种器件称为调频谐振式磁场传感器。上述 2 种类型器件的输出谐振信号幅度或频率一般通过开环或闭环测量方式获取。

不论是调幅还是调频谐振式器件, 二者本质上都是通过测量洛伦兹力的变化来检测外界磁场。对于调幅谐振式磁场传感器而言, 通过优化微机械结构尺寸, 使其获得对洛伦兹力更高的灵敏度, 从而提升器件对磁场的检测灵敏度。因为微机械谐振结构在其谐振频率点处对力的响应远大于在远离谐振点处的响应, 所以通过设计使器件工作在其谐振频率点可以有效地提升微机械结构对洛伦兹力的检测灵敏度。灵敏度提升的大小取决于谐振器的品质因数 Q ^[18]。因此, 增大调幅谐振式磁场传感器的 Q 值有利于增加其磁场灵敏度。对于调频谐振式磁场传感器而言, 因为灵敏度由谐振频率对洛伦兹力的依赖特性决定, 即由器件的物理结构和材料特性决定, 所以 Q 值并不会影响直接器件的磁场灵敏度。但高 Q 值的器件有助于实现更好的输出信号信噪比和振荡器相位噪声指标, 进而改善器件的磁场检测分辨力。据报道, 调幅谐振式器件的灵敏度由 Q 值和机电耦合系数的乘积决定。近年来, 如何提升微机械谐振器的 Q 值也成为了该领域的一个研究热点。 Q 值也成为了人们衡量谐振式磁场传感器性能的一个重要参数。目前, 已经有多种提升 Q 值的方法被提出, 包括将谐振器封装在真空环境中, 通过减小空气阻尼可以提升器件 Q 值^[19]。通过优化设计谐振器的物理结构和尺寸也已经被证明可以有效提升 Q 值^[20]。另外, 调频谐振式器件的优点在于输出信号为频率, 能够通过成熟的频率检测方案获得较强的抗干扰能力。同时, 数字化的输出使其能够获得比调幅谐振式器件更大的带宽^[21], 但目前调频谐振式器件的问题在于其灵敏度较低^[22]。

1 调幅谐振式磁场传感器

实现调幅谐振式 MEMS 磁场传感器的一种方式是采用硅上压电薄膜(Thin-film Piezoelectric on Silicon, TPoS)谐振器结构。TPoS 谐振器的优点是具有良好的机电换能效率、较高的品质因数 Q 、稳定可靠的机械结构, 且不需要真空封装^[23]。这种结构的谐振器采用压电换能方式。另一种常用的换能方式是电容式。大多数基于电容式的磁场传感器需要真空封装, 以减小空气阻尼的影响。真空封装能够有效地提高谐振器的 Q 值, 但同时也增加了器件制造的成本。另外, 压阻式换能也是一种常用的换能方式, 它能够提供较高的机电换能效率和磁场灵敏度, 但压阻式换能需要施加偏置电流, 增加了器件功耗, 并使器件容易受到噪声的影响, 降低了器件的信噪比和分辨力^[24]。表 1 列出了近期报道的调幅式 MEMS 磁场传感器的性能指标, 包括采用的换能方式、谐振频率、

灵敏度、工作环境气压和品质因数。

表 1 谐振式 MEMS 磁场传感器性能总结

Table 1 Summary of the reported performance of MEMS-based resonant magnetic field sensors

references	transduction	resonant frequency/kHz	responsivity/(ppm/T)	pressure level /Torr	Q-factor
[25]	capacitive	107.40	138.70	15.00	300
[26]	capacitive	46.96	1 417.00	0.75	10 000
[27]	capacitive	19.34	54 967.00	0.26	2 500
[24]	piezoelectric	2 600.00	9.00	air	1 674
[28]	piezoelectric	400.00	53 080.00	air	10 000
[29]	piezoelectric	6 380.00	21.20	air	1 946
[30]	piezoelectric	160.00	12 026.00	air	508

目前，基于幅值变化的磁场传感器的工作原理为通过在 MEMS 谐振器结构中施加一对差动交流输入电压 ($+U_{AC/2}$ 和 $-U_{AC/2}$)，进而产生一对交流驱动电流 (I_{in})。驱动电流一般通过金属走线绕谐振器半周。在外界磁场的作用下，金属走线中的电流会产生洛伦兹力，并作用在 MEMS 谐振器上，激励器件工作在特定的振动模态。因为产生的洛伦兹力大小依赖于磁场大小，所以 MEMS 谐振器的输出电信号也受磁场影响。因此，可以通过检测 MEMS 谐振器的输出信号幅度即可计算出磁场大小。洛伦兹力 (F_L) 受磁场的影响可以用式(1)描述：

$$F_L = BI_{in}L_t \quad (1)$$

式中： I_{in} 为输入电流； L_t 为金属走线的有效长度； B 为磁场。当输入电流信号的频率与谐振器谐振频率 (f_n) 一致时，谐振器的振动幅度达到最大值 (u_m)：

$$u_m = \frac{F_L}{\kappa} Q \quad (2)$$

式中 κ 为谐振器的弹性系数。

由于压电效应，谐振器的机械振动将导致输出电极上产生变化的电荷，即输出电流 (I_{out})。定义谐振器的转换因子 (η) 为：

$$\eta = \frac{q}{u_m} \quad (3)$$

则输出电流 (I_{out}) 可以表示为：

$$I_{out} = 2\pi f_n q \quad (4)$$

结合式(1)~式(4)可以推导得到：

$$I_{out} = 2\pi f_n \eta \frac{BI_{in}L_t}{\kappa} Q \quad (5)$$

如式(5)所示，调幅谐振式磁场传感器的输出电流 I_{out} 依赖于输入电流 I_{in} 的大小。因此，为了除去输入电流的影响，一般采用归一化灵敏度 (ψ) 来比较不同器件的磁场灵敏度：

$$\psi = \frac{I_{out}}{I_{in}B} = 2\pi f_n \eta \frac{L_t}{\kappa} Q \quad (6)$$

图 1 为基于横向扩展振动模态的谐振式磁场传感器的敏感单元结构示意图。该器件采用方形板结构。当外界存在 Z 轴方向磁场时，通过方形板上方金属线的激励电流会产生洛伦兹力，激发方形板在宽度方向 (Y 轴方向) 上周期性地收缩和扩展，并通过压电效应使输出电极上产生变化的电荷，即输出电流。通过检测输出电流的幅度大小即可检测 Z 轴磁场的大小。在标准大气压下，该器件测试得到的谐振频率为 17.95 MHz，Q 值为 1 500，磁场灵敏度为 63.27 mV/T，归一化灵敏度为 6 142 ppm/T^[31]。

图 2 为基于角拍动模态的磁场传感器敏感单元的结构示意图。该传感器由边长为 800 μm 的正方形板构成，通过两端的锚点支撑。与图 1 中方形板类似，激励电流沿着方形板边缘的金属线流动。当 X 轴方向存在外界磁场时，激励电流产生 Z 轴方向的洛伦兹力，并激励谐振器振动在角拍动模态^[32]。如图 2 所示，角拍动模态会在正方形板的中心产生最大的应力，所以输出电极需要设计在正方形结构的中央位置。在标准大气压下，该器件测试得到的谐振频率为 159.17 kHz，Q 值为 526，磁场灵敏度为 0.28 V/T，归一化灵敏度为 12 156 ppm/T^[33]。

除方形谐振器外，研究人员也利用圆盘谐振器设计了磁场传感器。图 3 为基于圆盘谐振器的磁场传感器敏感单元的结构示意图。圆盘谐振器采用的振动模态为圆周扩展模态。该模态的特点是谐振器在圆盘径向上周期性

地收缩或扩展。圆盘谐振器的半径为 $400\ \mu\text{m}$ ，由 4 个 T 型梁支撑，如图 3 所示。T 型梁除了起到支撑的作用外，它们还为电流提供了走线的路径。该器件的输入信号为交流电流 I_{AC} 。当存在 Z 轴磁场时，交流电流产生垂直于电流路径的分布洛伦兹力，从而对圆盘谐振器施加径向力。在输入信号频率与谐振频率相同时，产生的洛伦兹力将激励谐振器在圆周扩展模态工作。由于压电效应，圆盘中央的电极上将产生输出电流。后端电路通过检测输出电流的大小来检测磁场大小的变化。在标准大气压下，圆形谐振器器件测试得到的谐振频率为 $6.32\ \text{MHz}$ ， Q 值为 697，磁场灵敏度为 $7.53\ \text{mV/T}$ ，归一化灵敏度为 $7\ 680\ \text{ppm/T}^{[29]}$ 。

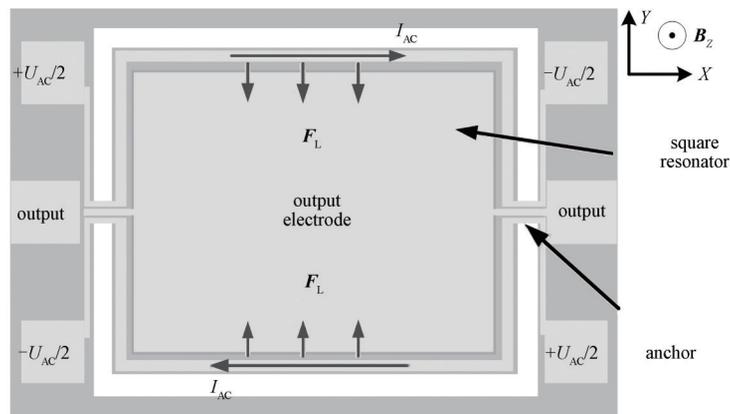


Fig.1 Schematic of Width Extensional(WE) mode TPoS resonator for magnetometer application
图 1 基于横向扩展振动模式的 TPoS 磁场传感器的敏感单元的结构示意图

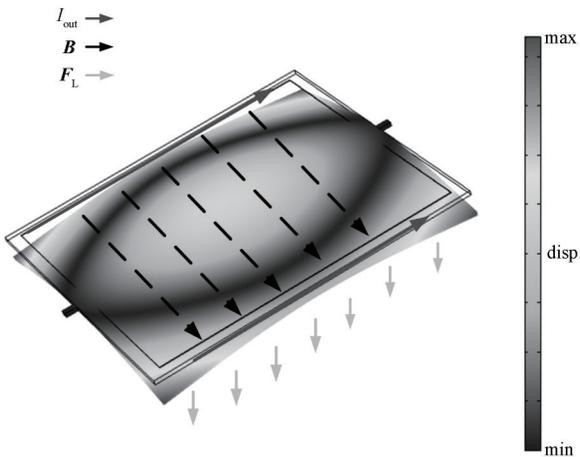


Fig.2 Simulated stress distribution of square resonator operating in a corner-flapping mode
图 2 基于角拍动模式的方形谐振器的应力分布仿真图

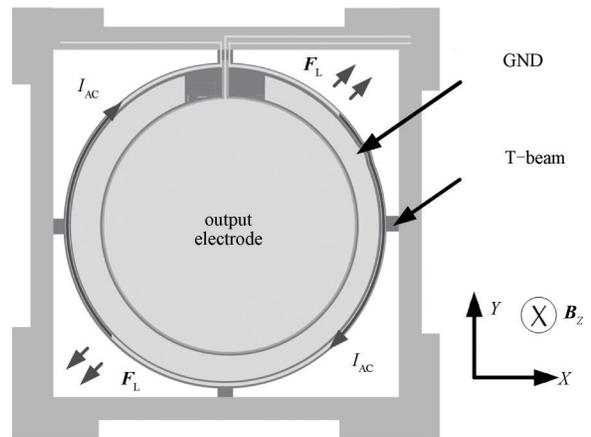


Fig.3 Schematic of the disk TPoS resonator operating in contour mode
图 3 基于扩展模式的圆盘磁场传感器的结构示意图

为了提升磁场传感器的性能，研究人员对圆盘谐振器进行了许多改进。提高器件性能途径之一是提升器件的品质因数 Q 。经过分析研究，锚点损耗是影响品质因数 Q 的主要原因^[34]。因此，通过优化设计锚点的结构和尺寸可以降低锚点损耗。例如，将图 3 中 T 型梁的宽度从 $34\ \mu\text{m}$ 减少到 $24\ \mu\text{m}$ ，同时保持梁长宽比不变，以增大梁的柔度。这样可以减少锚点处的能量损耗，提高 Q 值。研究人员也通过加入接地电极来改善器件的性能。研究人员在外部金属回路和中心输出电极之间增加了接地电极。接地电极的功能是提升圆盘边缘金属走线与中心输出电极隔离效果，进而降低从输入端口到输出端口的寄生电容效应。

圆盘谐振器的输出信号的强度与圆盘的面积成比例，如图 3 所示。由于谐振器的谐振频率与圆盘半径成反比，所以增加圆盘谐振器的半径会改变谐振器的谐振频率。为了解决这个问题，研究人员通过耦合多个圆盘谐振器可以在不降低谐振频率的同时提升压电换能面积，进而提高器件的灵敏度。这种方法目前已经广泛用于降低射频器件的动态电阻^[35-37]。采用该方法的另一个优点是可以设计对称机械结构减少锚点损耗，进而改善品质因数。这是因为 2 个耦合圆盘谐振器可以固定在耦合梁振动幅度最小的位置，利用相互对称的振动模态降低锚点损耗，减小支撑梁对于谐振器的影响。图 4 中给出了耦合双圆盘的磁场传感器。在标准大气压下，该器件测

试得到的谐振频率为 6.39 MHz， Q 值为 1 732，磁场灵敏度为 12.72 mV/T，归一化灵敏度为 21 200 ppm/T^[29]。

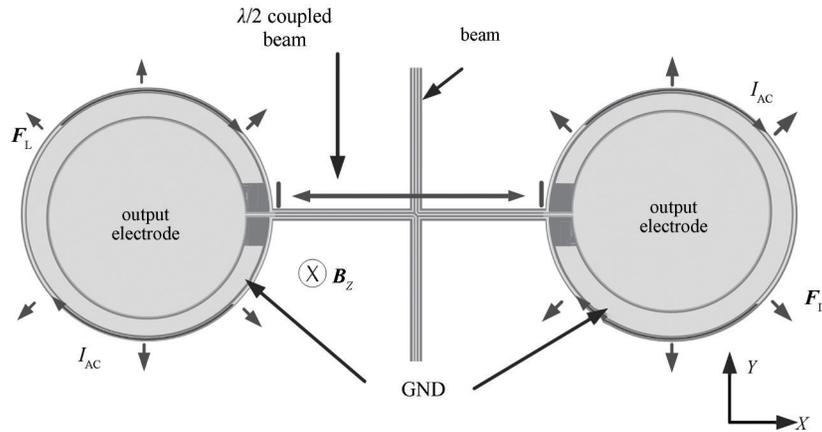


Fig.4 Schematic of two-disk TPoS resonators that are mechanically coupled
图4 采用双圆盘耦合 TPoS 谐振器的磁场传感器敏感单元结构示意图

2 调频谐振式磁场传感器

调频式磁场传感器也是利用 MEMS 谐振器作为磁场敏感单元，通过外界磁场对加载偏置电流产生的洛伦兹力来影响谐振器的等效弹性系数，进而改变谐振频率。因此，这种磁场传感器是通过检测谐振频率的偏移量来检测外界磁场。图 5 为基于悬臂梁结构的磁场传感器敏感单元的结构示意图。该传感器的机电换能方式采用电热激励和压阻式检测。其中，电热激励是利用 2 层材料不同的热膨胀系数实现，而压阻式检测则是通过在悬臂梁的固定端设计压阻式三极管器件来检测固定端产生的应力。这样设计的原因是因为悬臂梁在振动时在固定端产生的应力最大。另外，该磁场传感器的加工制备方法结合了 CMOS 工艺和干法刻蚀工艺，实现了信号调理电路和磁场传感器的单片集成。该器件测试得到的谐振频率为 175 kHz，在谐振频率点的磁场灵敏度为 60 kHz/T，分辨力小于 1 μT。因为能够检测地磁场，所以该磁场传感器的潜在应用场景为消费电子产品中的电子罗盘^[21]。

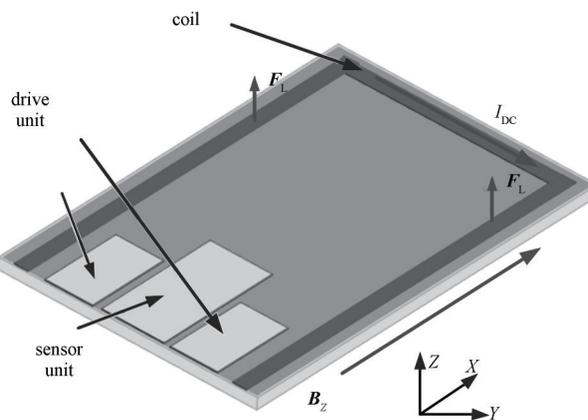


Fig.5 Schematic of the cantilever-based resonant magnetometer
图5 基于悬臂梁结构的谐振式磁场传感器的结构示意图

图 6 为另一种调频谐振式磁场传感器的敏感单元的结构示意图。该谐振器采用梭形结构作为振动主体，利用叉指电极实现静电激励和电容检测。它通过电学和机械方式将传感器的各个部分相互连接起来。其中，通过 4 根横梁弹簧将叉指电极和 2 根长横杆连接起来。在传感器工作时，直流偏置电流通过 2 个长横杆，电流方向从引脚 1 到引脚 2，然后从引脚 3 到引脚 4。通过设计使得长横杆在 Y 方向上的弹性系数远大于 X 方向。在传感器工作时，谐振器通过静电驱动，并保持在谐振状态。当该传感器被置于 Z 轴磁场中时，洛伦兹力施加在长横杆上。因为加载在 2 个长横杆上的洛伦兹力方向相反，所以使得梁式谐振器的有效弹性系数发生变化，进而导致其谐振频率的改变。该器件的输出信号通过后端信号处理电路检测谐振频率的偏移量即可推算出磁场强度大小。该器件在真空和 15 mTorr 压力环境下测试得到的谐振频率为 47.983 kHz，品质因数在 13 500 到 17 000 之间，灵敏度为

69.6 Hz/T，加工制备工艺与 CMOS 工艺兼容^[38]。

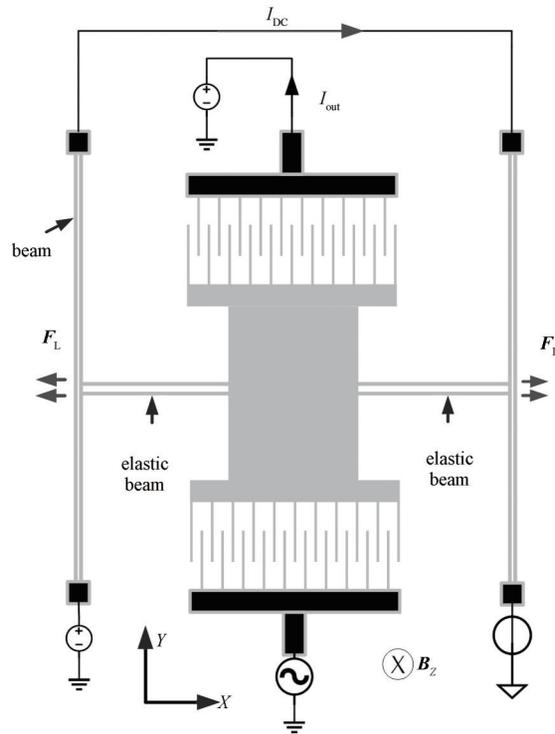


Fig.6 Schematic of resonant magnetometer based on interdigital transducer
图6 基于叉指电极结构的谐振式磁场传感器的结构示意图

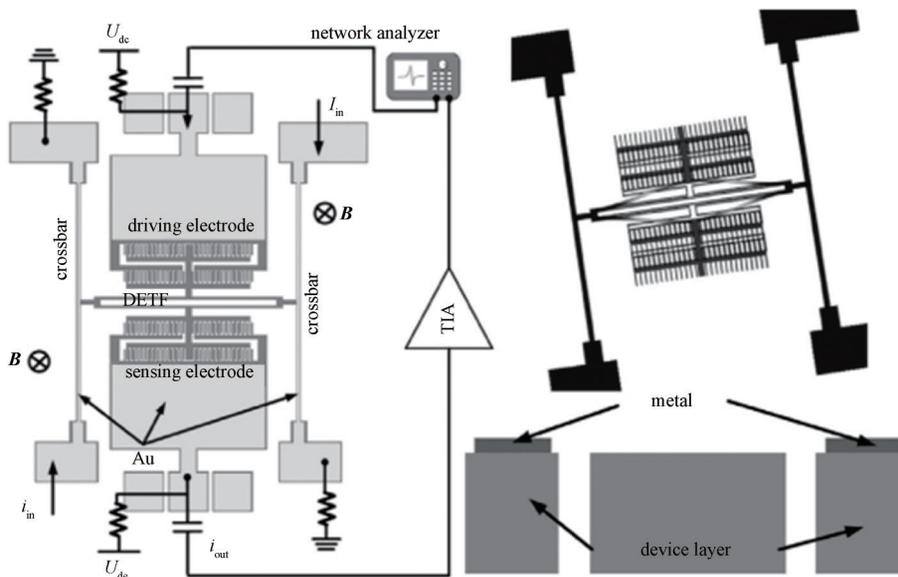


Fig.7 Schematic of a DETF-based resonant magnetometer and simulated anti-phase vibration mode^[37]
图7 基于双端固定音叉结构的谐振式磁场传感器的结构示意图和反相振动模式的仿真图^[37]

图7为一种基于双端固定音叉(Double-Ended Tuning Fork, DETF)的谐振式磁场传感器^[39]。该谐振器的中心部分是由2个平行的长为600 μm、宽为8 μm的梁构成，梁的两端被固定。每个梁连接一个梳齿电极结构。梳齿结构电极的作用是增加机电耦合面积，提高机电换能效率。其中，一个梳齿电极利用产生的静电力驱动谐振器进入振动状态，而另一个梳齿电极用于检测电极上电荷的变化，作为输出信号。当谐振器在平面内以反相模式振动时，在双头音叉的固定端会产生方向相反的应力，实现了相互抵消并降低锚点损耗的效果。通过这种降低锚点损耗的对称设计，该谐振器的品质因数 Q 将会得到大幅提升^[40]。该器件的问题是通过横梁的电流 I_{in} 将会产生焦耳热，引起材料机械性能的改变，产生非磁场影响的频率偏移。因此，为了最小化其影响，可以在沿着横杆

的硅器件层上沉积金属层，以减小横梁上的电阻。

图 8 为另一种类似 DETF 结构的磁场传感器敏感单元。该器件除中心梁的结构与 DETF 略有不同外，二者的磁场检测原理相同。该器件在中心处 2 个横向梁是通过一个直梁结构相互连接的，进而迫使 2 个梁同相振动。该器件的其余部分类似于图 7 中 DETF 结构。图 7 和图 8 所示 2 种结构中的硅层采用了 25 μm 和 10 μm 两种不同的厚度，其测试结果如表 2 所示。

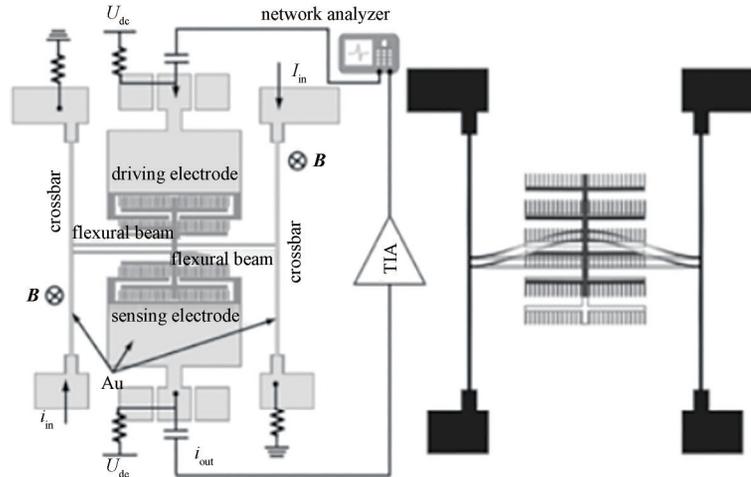


Fig.8 Schematic of a clamped-guided beam resonant magnetometer and simulated in-phase vibration mode^[37]

图 8 基于导向梁结构的谐振式磁场传感器的结构示意图和同相振动模式的仿真图^[37]

表 2 基于 DETF 结构的谐振式磁场传感器的测试数据总结

Table2 Performance summary of DETF resonant magnetic field sensors

thickness of Si layer	25 μm		10 μm	
vibration mode	in-phase	anti-phase	in-phase	anti-phase
resonant frequency/kHz	47.2	49.6	46.8	49.3
sensitivity/(ppm $\cdot \text{T}^{-1}$)	94.56	90.62	203.71	215.74
quality factor/Q	26 000	100 000	42 000	100 000

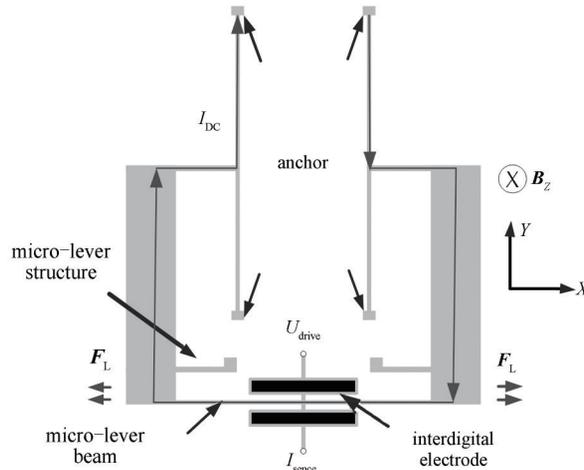


Fig.9 Schematic of the resonant magnetometer using micro-lever structures

图 9 采用微型杠杆结构的谐振式磁场传感器的结构示意图

图 9 是基于微型杠杆结构的谐振式磁场传感器的结构示意图。其中，谐振器采用的是弯曲梁式谐振器。当存在 Z 轴磁场时，流经弯曲梁的直流偏置电流 I_B 会产生洛伦兹力，导致弯曲梁的扭转，进而对弯曲梁加载轴向载荷，改变其谐振频率。为了提高该谐振器对磁场的灵敏度，研究人员添加了特殊的微杠杆结构，使洛伦兹力得到放大。如图 9 所示，电流在磁场作用下产生的洛伦兹力可以被视为等效的点载荷 F_p ，它作用在横杆的中心，以产生相同的偏移 X。当施加到杠杆系统输入处的力为 F_{in} ，则 F_{in} 可以表示为：

$$F_{in} = k_p X \tag{7}$$

式中 k_p 为梁对点载荷的刚度。 F_{in} 产生一个围绕支点的力矩，此外流经杠杆臂的电流产生的洛伦兹力会产生杠杆

臂上的附加力矩。这些力矩结合在一起,在谐振梁上产生一个力 F_{out} ,从而改变了谐振频率。但是现有的 MEMS 工艺由于精确度限制无法制造出完全理想的支点,所以传感器的最大放大倍数取决于工艺的精确度和微杠杆结构的设计^[41]。测试结果表明,该磁场传感器利用微杠杆的设计使磁场灵敏度被放大了 42 倍,达到了 6 687 ppm/(mA·T)。但该器件的问题是谐振器的 Q 值只有 540,主要损耗来源于空气的弹性阻尼,所以可以通过真空封装方法来解决^[42]。

3 结论

本文旨在对基于 MEMS 谐振器的 2 种主要类型磁场传感器进行介绍。两者的基本思路是将外界磁场通过洛伦兹力转换成谐振信号幅度或频率的改变,进而实现通过测量谐振信号的幅度或频率完成对外界磁场的检测。目前,谐振式磁场传感器采用的机电换能方式主要为电容式或压电式。电容式主要应用于调频式磁场传感,而压电式主要应用于调幅式传感。为了提高 Q 值,电容式传感器一般需要进行真空封装。由于其原理是基于电容的变化,所以弹簧结构和电容读出结构的设计是整个传感器的关键;压电式磁场传感器的性能则依赖于压电材料的选择和微机械结构的设计。

总体而言,基于 MEMS 器件的磁场传感器具有尺寸小、功耗低、易于集成等优点,符合磁场传感器对小型化、集成化需求日益增长的发展趋势。目前 MEMS 谐振式磁场传感器也面临一些挑战。调幅谐振式磁场传感器的挑战在于需要在品质因数 Q 和带宽之间做出权衡。另外,环境温度的变化会导致谐振器的谐振频率发生变化,从而对器件的工作灵敏度造成影响。因此,如何控制调幅谐振式磁场传感器的灵敏度保持恒定也是目前亟需解决的问题之一。对于调频谐振式磁场传感器而言,由于采用振荡信号的频率作为输出信号,因此也容易受到环境温度变化的影响,导致温漂指标较差^[43]。采用斩波电路可以改善温漂性能,但是这将以牺牲传感器占用的面积为代价,同时将增大整体功耗。另外,调频谐振式磁场传感器的另一个挑战是其灵敏度相对于传统的磁场传感技术仍然较低,不利于实现高分辨力指标。MEMS 磁场传感器的未来发展将以高分辨力、小尺寸、低功耗和低成本为主要目标,以求实现从实验室到商业产品的转化。因此,将谐振式 MEMS 磁场传感器和 CMOS 电路进行集成将是实现这一目标的有效途径^[44]。

当前,高度集成化的多功能传感器芯片是高性能智能传感器发展的重要方向。随着微加工及封装技术的突飞猛进,传感器正从只有单个敏感器件的单一功能传感芯片向具有多个敏感器件的多功能传感芯片方向发展。多功能传感芯片能够实现多个敏感器件的单片集成,可以最大程度地减小器件尺寸和功耗,在国防军事、导航定位、生物医学和消费电子等领域有着较大发展前景。本文介绍的谐振式 MEMS 磁场传感器已被证明是可以实现多功能传感芯片中磁场敏感单元的一种解决方案。例如,三轴磁场传感器作为九轴惯性传感器中不可或缺的一部分,需要与三轴加速度、三轴角加速度传感器集成在同一芯片上,从而实现惯性传感器的整体性能最优化。在磁场传感器与其他传感器进行单片集成的同时,如何避免受到来自其他传感器的干扰也是未来所面临的挑战之一。

参考文献:

- [1] LENZ J, EDELSTEIN S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631–649. doi:10.1109/JSEN.2006.874493.
- [2] SCHMELZ M, STOLZ R, ZAKOSARENKO V, et al. Highly sensitive miniature SQUID magnetometer fabricated with cross-type Josephson tunnel junctions[J]. Physica C: Superconductivity, 2012(476): 77–80. doi:10.1016/j.physc.2012.02.025.
- [3] HERRERA-MAY A L, GARCÍA-RAMÍREZ P J, AGUILERA-CORTÉS L A, et al. Mechanical design and characterization of a resonant magnetic field microsensors with linear response and high resolution[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 165(2): 399–409. doi:10.1016/j.sna.2010.07.005.
- [4] ZHANG Weiguan, LEE J E Y. A horseshoe micromachined resonant magnetic field sensor with high quality factor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(10): 1310–1312. doi:10.1109/LED.2013.2278031.
- [5] COWBURN R P, MOULIN A M, WELLAND M E. High sensitivity measurement of magnetic fields using microcantilevers[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(15): 2202–2204. doi:10.1063/1.119381.
- [6] WILLEMIN M, ROSSEL C, BRUGGER J, et al. Piezoresistive cantilever designed for torque magnetometry[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83(3): 1163–1170. doi:10.1063/1.366811.
- [7] MILLER L M, PODOSEK J A, KRUGLICK E, et al. A μ -magnetometer based on electron tunneling[C]// Proceedings of Ninth International Workshop on Micro Electromechanical Systems. San Diego, CA, USA: IEEE, 1996: 467–472. doi:10.1109/

- MEMSYS.1996.494027.
- [8] DILELLA D, WHITMAN L J, COLTON R J, et al. A micromachined magnetic-field sensor based on an electron tunneling displacement transducer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000,86(1/2):8–20. doi:10.1016/S0924-4247(00)00303-4.
- [9] EMMERICH H, SCHOFTHALER M. Magnetic field measurements with a novel surface micromachined magnetic-field sensor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000,47(5):972–977. doi:10.1109/16.841228.
- [10] LATORRE L, BEROULLE V, NOUET P. Design of CMOS MEMS based on mechanical resonators using a RF simulation approach[J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2004, 23(6):962–967. doi:10.1109/TCAD.2004.828113.
- [11] DONG Shuxiang, LI Jiefang, VIEHLAND D. Vortex magnetic field sensor based on ring-type magnetoelectric laminate[J]. *Applied Physics Letters*, 2004,85(12):2307–2309. doi:10.1063/1.1791732.
- [12] FETISOV Y K, BUSH A A, KAMENTSEV K E, et al. Ferrite-piezoelectric multilayers for magnetic field sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006,6(4):935–938. doi:10.1109/JSEN.2006.877989.
- [13] HERRERA-MAY A L, AGUILERA-CORTÉS L A, GARCÍA-RAMÍREZ P J, et al. Resonant magnetic field sensors based on MEMS technology[J]. *Sensors*, 2009,9(10):7785–7813. doi:10.3390/s91007785.
- [14] WU Guoqiang, XU Dehui, XIONG Bin, et al. Resonant magnetic field sensor with capacitive driving and electromagnetic induction sensing[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013,34(3):459–461. doi:10.1109/LED.2013.2241727.
- [15] TANG Xuehua, YOU Zheng, YANG Yongjun, et al. A comb driving magnetometer based on tunnel effect[J]. *Solid State Phenomena*, 2007(121/123):561–564. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.121-123.561.
- [16] YANG H H, MYUNG N V, YEE J, et al. Ferromagnetic micromechanical magnetometer[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2002(97/98):88–97. doi:10.1016/S0924-4247(01)00809-3.
- [17] KEPLINGER F, KVASNICA S, JACHIMOWICZ A, et al. Lorentz force based magnetic field sensor with optical readout[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2004,110(1/3):112–118. doi:10.1016/j.sna.2003.10.025.
- [18] PILLAI G, LI S S. Piezoelectric MEMS resonators: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021,21(11):12589–12605. doi:10.1109/JSEN.2020.3039052.
- [19] TU C, FRANK A, MICHAEL S, et al. Applying laser Doppler vibrometry to probe anchor losses in MEMS AlN-on-Si contour mode resonators[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2017(263):188–197. doi:10.1016/j.sna.2017.06.003.
- [20] TU C, LEE J E Y. Boosting the quality factor of low impedance VHF piezoelectric-on-silicon lateral mode resonators using etch holes[J]. *Procedia Engineering*, 2016(168):1261–1264. doi:10.1016/j.proeng.2016.11.443.
- [21] SUNIER R, VANCURA T, LI Yue, et al. Resonant magnetic field sensor with frequency output[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006,15(5):1098–1107. doi:10.1109/JMEMS.2006.880212.
- [22] LI Mo, NITZAN S, HORSLEY D A. Frequency-modulated Lorentz force magnetometer with enhanced sensitivity via mechanical amplification[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015,36(1):62–64. doi:10.1109/LED.2014.2372617.
- [23] TU Cheng, LEE J E Y. A semi-analytical modeling approach for laterally-vibrating thin-film piezoelectric-on-silicon micromechanical resonators[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015,25(11):115020. doi:10.1088/0960-1317/25/11/115020.
- [24] MEHDIZADEH E, KUMAR V, POURKAMALI S. Sensitivity enhancement of Lorentz force MEMS resonant magnetometers via internal thermal-piezoresistive amplification[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014,35(2):268–270. doi:10.1109/LED.2013.2293349.
- [25] ROUF V T, LI Mo, HORSLEY D A. Area-efficient three axis MEMS Lorentz force magnetometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(11):4474–4481. doi:10.1109/JSEN.2013.2264807.
- [26] LI Mo, ROUF V T, THOMPSON M J, et al. Three-axis Lorentz-force magnetic sensor for electronic compass applications[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012,21(4):1002–1010. doi:10.1109/JMEMS.2012.2196493.
- [27] LAGHI G, MARRA C R, MINOTTI P, et al. A 3-D micromechanical multi-loop magnetometer driven off-resonance by an on-chip resonator[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016,25(4):637–651. doi:10.1109/JMEMS.2016.2563180.
- [28] KUMAR V, RAMEZANY A, MAHDAVI M, et al. Amplitude modulated Lorentz force MEMS magnetometer with picotesla sensitivity[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016,26(10):105021. doi:10.1088/0960-1317/26/10/105021.
- [29] GHOSH S, LEE J E Y. Piezoelectric-on-silicon Lorentz force magnetometers based on radial contour mode disk resonators[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2018(281):185–195. doi:10.1016/j.sna.2018.09.009.
- [30] GHOSH S, LEE J E Y. Piezoelectric-on-silicon MEMS Lorentz force lateral field magnetometers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2019,66(5):965–974. doi:10.1109/TUFFC.2019.2903122.
- [31] GHOSH S, LEE J E Y. A piezoelectric-on-silicon width-extensional mode Lorentz force resonant MEMS magnetometer[J].

- Sensors and Actuators A:Physical, 2017(260):169–177. doi:10.1016/j.sna.2017.04.040.
- [32] TANG Kenwei, CHENG P C, TRIVEDI S, et al. Design and characterization of an ALN piezoelectric MEMS magnetometer[C]// 2021 the 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems(Transducers). Orlando, FL, USA: IEEE, 2021:414–417. doi:10.1109/Transducers50396.2021.9495675.
- [33] GHOSH S, LEE J E Y. Lorentz force magnetic sensors based on piezoelectric aluminum nitride on silicon micromechanical resonators[C]// 2018 IEEE the 13th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems(NEMS). Singapore:IEEE, 2018:288–291. doi:10.1109/NEMS.2018.8556900.
- [34] GHOSH S, LEE J E Y. A Lorentz force magnetometer based on a piezoelectric-on-silicon radial-contour mode disk[C]// 2017 the 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems(TRANSDUCERS). Kaohsiung, Taiwan: IEEE, 2017:830–833. doi:10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994177.
- [35] ZHU Haoshen, XU Yuanjie, LEE J E Y. Piezoresistive readout mechanically coupled lamé mode SOI resonator with Q of a million [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015,24(4):771–780. doi:10.1109/JMEMS.2015.2414441.
- [36] LI Shengshian, LIN Yuwei, REN Zeying, et al. An MSI micromechanical differential disk-array filter[C]// TRANSDUCERS 2007—2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. Lyon, France: IEEE, 2007:307–311. doi:10.1109/SENSOR.2007.4300130.
- [37] LI Shengshian, LIN Yuwei, REN Zeying, et al. Disk-Array design for suppression of unwanted modes in micromechanical Composite-Array filters[C]// The 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Istanbul, Turkey: IEEE, 2006:866–869. doi:10.1109/MEMSYS.2006.1627937.
- [38] BAHREYNI B, SHAFAI C. A resonant micromachined magnetic field sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2007,7(9):1326–1334. doi:10.1109/JSEN.2007.902945.
- [39] ZHANG Weiguan, LEE J E Y. Frequency-based magnetic field sensing using Lorentz force axial strain modulation in a double-ended tuning fork[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2014(211):145–152. doi:10.1016/j.sna.2014.01.022.
- [40] ALCHEIKH N, MBAREK S B, AMARA S, et al. Highly sensitive resonant magnetic sensor based on the veering phenomenon[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,21(12):13165–13175. doi:10.1109/JSEN.2021.3065733.
- [41] LEE J E Y, YAN Jize, SESHIA A A. Anchor limited Q in flexural mode resonators[C]// 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. Beijing:IEEE, 2008:2213–2216. doi:10.1109/ULTSYM.2008.0548.
- [42] PEDERSEN C B W, SESHIA A A. On the optimization of compliant force amplifier mechanisms for surface micromachined resonant accelerometers[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004,14(10):1281. doi:10.1088/0960-1317/14/10/001.
- [43] 鲍飞鸿, NGUYEN T L, 李昕熠, 等. 基于 MEMS 方块谐振器的 10 MHz 振荡器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):820–824. (BAO Feihong, NGUYEN T L, LI Xinyi, et al. A 10 MHz oscillator using square MEMS resonator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):820–824.) doi:10.11805/TKYDA201605.0820.
- [44] VALLE J J, SÁNCHEZ-CHIVA J M, FERNÁNDEZ D, et al. Design, fabrication, characterization and reliability study of CMOS-MEMS Lorentz-force magnetometers[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2022(8):103. doi:10.1038/s41378-022-00423-w.

作者简介:

武颖杰(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为谐振式 MEMS 磁场传感器. email:18754296839@163.com.

吕秀梅(1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器电气系统设计及开发.

张自强(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器电气系统设计与检测技术.

涂程(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 MEMS 传感器和射频声学器件.

张晓升(1984-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为 MEMS、微纳能源采集技术、多传感融合智能微系统等.